

# PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 10-143162

(43)Date of publication of application : 29.05.1998

(51)Int.Cl.

G10H 7/08

(21)Application number : 08-296069

(71)Applicant : MATSUSHITA ELECTRIC IND CO LTD

(22)Date of filing : 08.11.1996

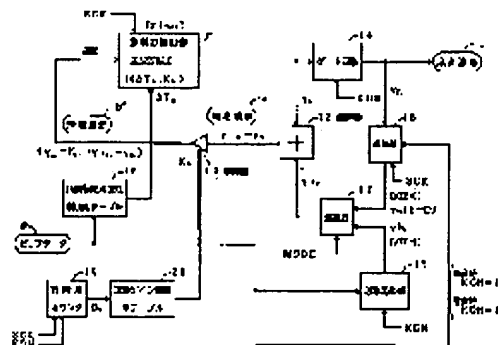
(72)Inventor : NAKANISHI MASAHIRO  
MORI DAISUKE

## (54) MEASUREMENT SYNTHESIZING DEVICE

### (57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To simulate the pitch characteristic (moving formant characteristic) and time characteristic (transient characteristic) of natural musical instrument tones by using simple circuitry.

SOLUTION: The difference (yin-yn) between the reference waveform yin formed by a waveform generating section 15 or delay device 16 and the vibration waveform yn formed by a nonlinear vibration section 11 is multiplied by a perturbation gain  $K_n$  variable with lapse of time read out of a table 20 for controlling the perturbation gain corresponding to the count value of a counter 19 for clock in a multiplier 13, by which the perturbation waveform  $b'$  ( $f_{yn} = K_n(\text{yin} - \text{yn})$ ) to the nonlinear vibration section 11 is obtd. On the other hand, the time difference item  $\Delta T_n$  read out of a table 18 for controlling the intrinsic vibration frequency corresponding to pitch data (d) is set at the differential equation  $f(\Delta T_n, K_n)$  of the nonlinear vibration section 11. The differential equation  $f(\Delta T_n, K_n)$  of the nonlinear vibration section 11 is perturbed by the perturbation waveform  $b'$ .



## LEGAL STATUS

[Date of request for examination] 28.10.1999

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number] 3459948

[Date of registration] 15.08.2003

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

BD

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平10-143162

(43) 公開日 平成10年(1998) 5月29日

(51) Int. Cl. <sup>6</sup>  
G10H 7/08

識別記号

F I  
G10H 7/00

531

審査請求 未請求 請求項の数 9 O L (全20頁)

(21) 出願番号 特願平8-296069

(22) 出願日 平成8年(1996)11月8日

(71) 出願人 000005821

松下電器産業株式会社  
大阪府門真市大字門真1006番地

(72) 発明者 中西 雅浩

大阪府門真市大字門真1006番地 松下電器  
産業株式会社内

(72) 発明者 森 大輔

大阪府門真市大字門真1006番地 松下電器  
産業株式会社内

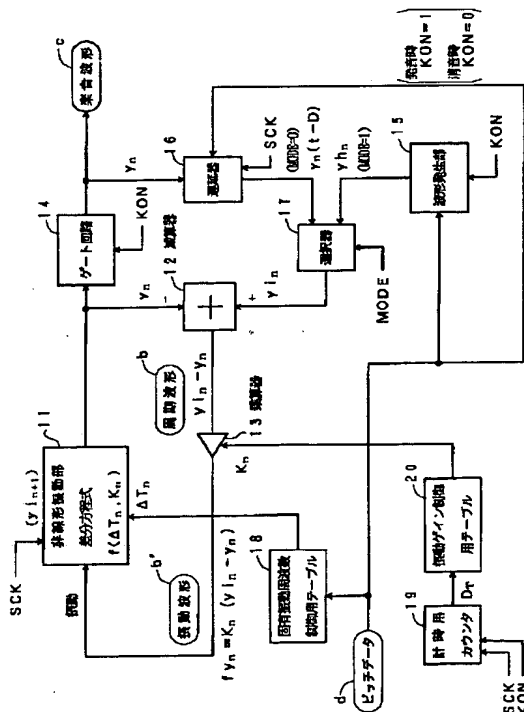
(74) 代理人 弁理士 岡田 和秀

(54) 【発明の名称】 楽音合成装置

(57) 【要約】

【課題】 自然楽器音の音高特性（移動フォルマント特性）と時間特性（過渡特性）を簡単な回路構成を用いてシミュレートする。

【解決手段】 波形発生部15または遅延器16が生成する基準波形 $y_i$ と非線形振動部11が生成する振動波形 $y_n$ との差分 $(y_i - y_n)$ に対して、計時用カウンタ19のカウント値に対応して振動ゲイン制御用テーブル20から読み出した時間経過とともに可変の振動ゲイン $K_n$ を乗算器13において掛け算して非線形振動部11に対する振動波形 $b'$  ( $f y_n = K_n (y_i - y_n)$ )を得る一方、ピッチデータ $d$ に対応して固有振動周波数制御用テーブル18から読み出した時間差分項 $\Delta T_n$ を非線形振動部11の差分方程式 $f(\Delta T_n, K_n)$ に設定し、振動波形 $b'$ により非線形振動部11の差分方程式 $f(\Delta T_n, K_n)$ を振動する。



## 【特許請求の範囲】

【請求項 1】 非線形微分方程式で記述される自励振動系を差分形式にデジタルシミュレートした非線形振動手段を楽音波形のピッチに相当する周期を有した周期波形で摂動させることにより非線形振動手段の振動を安定化させ所望の楽音波形を合成させる楽音合成装置において、前記非線形振動手段が演算する差分方程式の時間差分項 ( $\Delta T$ 。) を楽音波形のピッチに応じて制御することを特徴とする楽音合成装置。

【請求項 2】 非線形微分方程式で記述される自励振動系を差分形式にデジタルシミュレートした非線形振動手段を楽音波形のピッチに相当する周期を有した周期波形で摂動させることにより非線形振動手段の振動を安定化させ所望の楽音波形を合成させる楽音合成装置において、前記摂動の摂動ゲイン ( $K_0$ 。) を時間的に変化させることを特徴とする楽音合成装置。

【請求項 3】 非線形微分方程式で記述される自励振動系を差分形式にデジタルシミュレートした非線形振動手段と、基準波形を発生する波形発生手段と、前記波形発生手段が発生する基準波形と前記非線形振動手段が出力する振動波形との差分をとることに基づいて非線形振動手段を摂動する摂動波形を発生する減算手段と、所望の楽音波形のピッチに応じて前記非線形振動手段の時間差分項 ( $\Delta T$ 。) の値を変更することにより非線形振動手段の固有振動の周波数を制御する固有振動周波数制御手段とを備えていることを特徴とする楽音合成装置。

【請求項 4】 非線形微分方程式で記述される自励振動系を差分形式にデジタルシミュレートした非線形振動手段と、前記非線形振動手段が出力する振動波形を所定時間遅延させた後に基準波形として出力する遅延手段と、前記遅延手段が発生する基準波形と前記非線形振動手段が出力する振動波形との差分をとることに基づいて非線形振動手段を摂動する摂動波形を発生する減算手段と、所望の楽音波形のピッチに応じて前記非線形振動手段の時間差分項 ( $\Delta T$ 。) の値を変更することにより非線形振動手段の固有振動の周波数を制御する固有振動周波数制御手段とを備えていることを特徴とする楽音合成装置。

【請求項 5】 非線形微分方程式で記述される自励振動系を差分形式にデジタルシミュレートした非線形振動手段と、基準波形を発生する波形発生手段と、前記波形発生手段が発生する基準波形と前記非線形振動手段が出力する振動波形との差分をとることに基づいて非線形振動手段を摂動する摂動波形を発生する減算手段と、発音開始を起点として時間経過を計時する計時手段と、前記計時手段が計時した時間データに応じて前記減算手段が出力する摂動波形の摂動ゲイン ( $K_0$ 。) を制御する摂動ゲイン制御手段とを備えていることを特徴とする楽音合成装置。

【請求項 6】 非線形微分方程式で記述される自励振動

系を差分形式にデジタルシミュレートした非線形振動手段と、前記非線形振動手段が出力する振動波形を所定時間遅延させた後に基準波形として出力する遅延手段と、前記遅延手段が発生する基準波形と前記非線形振動手段が出力する振動波形との差分をとることに基づいて非線形振動手段を摂動する摂動波形を発生する減算手段と、発音開始を起点として時間経過を計時する計時手段と、前記計時手段が計時した時間データに応じて前記減算手段が出力する摂動波形の摂動ゲイン ( $K_0$ 。) を制御する摂動ゲイン制御手段とを備えていることを特徴とする楽音合成装置。

【請求項 7】 非線形微分方程式で記述される自励振動系を差分形式にデジタルシミュレートした非線形振動手段と、基準波形を発生する波形発生手段と、前記波形発生手段が発生する基準波形と前記非線形振動手段が出力する振動波形との差分をとることに基づいて非線形振動手段を摂動する摂動波形を発生する減算手段と、所望の楽音波形のピッチに応じて前記非線形振動手段の時間差分項 ( $\Delta T$ 。) の値を変更することにより非線形振動手段の固有振動の周波数を制御する固有振動周波数制御手段と、発音開始を起点として時間経過を計時する計時手段と、前記計時手段が計時した時間データに応じて前記減算手段が出力する摂動波形の摂動ゲイン ( $K_0$ 。) を制御する摂動ゲイン制御手段とを備えていることを特徴とする楽音合成装置。

【請求項 8】 非線形微分方程式で記述される自励振動系を差分形式にデジタルシミュレートした非線形振動手段と、前記非線形振動手段が出力する振動波形を所定時間遅延させた後に基準波形として出力する遅延手段と、前記遅延手段が発生する基準波形と前記非線形振動手段が出力する振動波形との差分をとることに基づいて非線形振動手段 a を摂動する摂動波形を発生する減算手段と、発音開始を起点として時間経過を計時する計時手段と、前記計時手段が計時した時間データに応じて前記減算手段が出力する摂動波形の摂動ゲイン ( $K_0$ 。) を制御する摂動ゲイン制御手段と、所望の楽音波形のピッチに応じて前記非線形振動手段の時間差分項 ( $\Delta T$ 。) の値を変更することにより非線形振動手段の固有振動の周波数を制御する固有振動周波数制御手段とを備えていることを特徴とする楽音合成装置。

【請求項 9】 非線形微分方程式で記述される自励振動系を差分形式にデジタルシミュレートした非線形振動手段と、第 1 の基準波形を発生する波形発生手段と、前記非線形振動手段が出力する振動波形を所定時間遅延させた後に第 2 の基準波形として出力する遅延手段と、前記第 1 の基準波形と前記第 2 の基準波形とを切り換えて基準波形として選択的に出力する選択手段と、前記選択手段が発生する基準波形と前記非線形振動手段が出力する振動波形との差分をとることに基づいて非線形振動手段を摂動する摂動波形を発生する減算手段と、発音開始を

起点として時間経過を計時する計時手段と、前記計時手段が計時した時間データに応じて前記減算手段が出力する振動波形の振動ゲイン ( $K_n$ ) を制御する振動ゲイン制御手段と、所望の楽音波形のピッチに応じて前記非線形振動手段の時間差分項 ( $\Delta T_n$ ) の値を変更することにより非線形振動手段の固有振動の周波数を制御する固有振動周波数制御手段とを備えていることを特徴とする楽音合成装置。

#### 【発明の詳細な説明】

##### 【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、電子鍵盤楽器（電子ピアノ・電子オルガン・電子キーボードなど）やシンセサイザなどの電子楽器の音源、パソコンに搭載されてMIDIケーブルを介して演奏情報を送出するときの音源モジュールなどとして用いられる楽音合成装置に関し、特に非線形の微分方程式（例えば、レスラーの方程式やファンデアポールの方程式など）で記述される自励振動系を楽音の合成原理に応用したものに關する。楽音とは、一般的には、「楽器の演奏によって奏でられる音」の意である。ただし、シンセサイザ等の場合には人の声も含むものである。

##### 【0002】

【従来の技術】従来、この種の装置として、非線形の微分方程式で記述される自励振動系をアナログ回路で実現したものが開示されている（Mayer-Kress: "Musical Signals from Chua's Circuit", IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS-II: ANALOG AND DIGITAL SIGNAL PROCESSING, VOL. 40, NO. 10, OCTOBER 1993 p688-p695）。この文献によれば、非線形の微分方程式で記述される自励振動系の回路が生成するリミットサイクル（安定な周期的振動）やカオス（不安定な非周期的振動）を楽音に応用した回路例が記載されている。この振動系の他にも、例えばファンデアポールやローレンツシステムなど、非線形の微分方程式で記述される自励振動系が一般的に知られている。

【0003】これらのリミットサイクルやカオスはもともと自励振動系が潜在的に内在しているものであり、リミットサイクルをどのようにして抽出するのが問題となる。

【0004】また、これらの振動系をデジタルシミュレートしたのもも開示されている（Rick-Bidlack: "Chaotic Systems as Simple (but Complex) Compositional Algorithms", Computer Music Journal, Vol. 16, Number. 3, Fall 1992 p33-p47）。この文献によれば、非線形の微分方程式で記述される自励振動系をオイラーの差分法を用いて差分方程式に変換することにより、コンピュータ（デジタル演算）上で自励振動系の振動をシミュレートした例が紹介されている。これらの振動系は、適当な初期値を与えたり、外的な強制振動（摂動）を与えることにより、ある種の振動状態（リミットサイクルと呼ばれ

る周期性のある振動や、カオス状態と呼ばれる不安定な非周期的振動）になったり、また差分方程式中の係数値（ $a$ ,  $b$ ,  $c$ ）を変更することによりその振動の形態が変化することが知られている。

【0005】また、これらの振動系がカオス状態にならないように制御する方法についても開示されている（K. Pyragas: "Continuous control of chaos by self-controlling feedback", Physics Letters A 170, 1992 p421-p428: 以降、文献Aとする）。この文献Aによれば、例えばロスラーやローレンツやダフィングといった振動系に外的摂動を与えたり、自己フィードバック系にすることにより、系の振動を安定した周期的振動にすることについて記載されている。なお、摂動とは、振動系に対して外部から強制的にさらに振動を加えることである。また、自励振動系に潜在的に内在している周期性のある振動、ないしは自励振動系の振動を安定した周期的振動にすることを「リミットサイクル」と称する。

【0006】以下、図面を参照しながら上述したような従来の楽音合成装置について説明する。

【0007】図14は従来の技術に係る楽音合成装置の構成を示すブロック図である。これは上記の文献Aに該当する。図14において、11は非線形の自励振動系に相当する演算を行う非線形振動部、12は選択器17の出力 $y_i$ から非線形振動部11の出力 $y_n$ （後述する式（数2）の $y_n$ ）を減算する減算器、13は減算器12の出力である周期波形 $b$ に相当する（ $y_i - y_n$ ）に所定の増幅率である振動ゲイン $K_n$ を乗算する乗算器、14は例えば電子鍵盤楽器の鍵盤を押したときに生じる発音フラグ $KON$ （「キーオン」と呼ぶ）が入力されている間は非線形振動部11の出力を楽音波形 $c$ として出力するゲート回路、15は予めメモリに記憶された基準波形（正弦波形） $y_h$ を発音フラグ $KON$ の入力に同期して読み出して出力する波形発生部、16はゲート回路14の出力 $y_g$ をピッチデータ $d$ に相当する時間分だけ遅延させて出力 $y_d$ （ $t-D$ ）として出力する遅延器、17はモード選択フラグ $MODE$ が値0のときに遅延器16の出力 $y_d$ （ $t-D$ ）を減算器12に基準波形 $y_i$ として送出し、モード選択フラグ $MODE$ が値1のときに波形発生部15の出力 $y_h$ を減算器12に基準波形 $y_i$ として送出する選択器である。なお、発音フラグ $KON$ は例えば電子鍵盤楽器の鍵盤を押したときの発音時には値1となり、鍵盤の押しを解除したときの消音時に値0となる。ゲート回路14から出力される楽音波形 $c$ の信号は図示しないD/A変換器、増幅器を含むサウンドシステムを介してスピーカから音声出力される。

【0008】波形発生部15は例えば1周期分の正弦波を記憶した読み出し専用メモリ（ROM）と、発音フラグ $KON$ の発生時以降にメモリのアドレスを繰り返し更新するカウンタとを用いて簡単に構成できるので、内部

構成についての説明は省略する。また遅延器16についても、随時読み書きメモリ(RAM)をリングメモリ形式(ある番地からある番地までの読み出しをサイクリックに行う)で構成し、その読み出しポインタRPと書き込みポインタWPの間隔であるピッチデータdを楽器の操作部にある調整つまみ等の操作で調整することにより遅延量を制御するものであり、これも簡単に構成できるので、内部構成についての説明は省略する。また非線形振動部11はマイコンやDSP(デジタルシグナルプロ

セッサ)などのプログラマブルなプロセッサを用いて実現することができる。この楽音合成装置は、例えば1チップのデバイスで構成することができる。

【0009】非線形振動部11が、(数2)に示す差分方程式 $f(\Delta T_n, K_n)$ をプログラムあるいはIC構成としてもち、その差分方程式を演算するものであるとする。

【0010】

【数1】

(レスラーの方程式)

$$\frac{dx}{dt} = -y - z$$

$$\frac{dy}{dt} = x + (a * y)$$

$$\frac{dz}{dt} = (b * x) - \{(-x + c) * z\}$$

【0011】

【数2】

(レスラーの方程式をオイラーの差分法で変換した差分方程式)

$$\dot{x}_n = -y_n - z_n$$

$$\dot{y}_n = x_n + (a * y_n)$$

$$\dot{z}_n = (b * x_n) - \{(-x_n + c) * z_n\}$$

$$x_{n+1} = \dot{x}_n + (x_n * \Delta T)$$

$$y_{n+1} = \dot{y}_n + (y_n * \Delta T)$$

$$z_{n+1} = \dot{z}_n + (z_n * \Delta T)$$

( $\dot{x}_n, \dot{y}_n, \dot{z}_n$ はそれぞれ $x_n, y_n, z_n$ の1次導関数)

【0012】(数1)は非線形の微分方程式の1つであるレスラーの方程式である。(数2)は(数1)のレスラーの方程式を、オイラーの差分法を用いて差分形式に変換したものである。(数1)のレスラーの方程式はアナログ的表現であり、これを(数2)の差分方程式 $f(\Delta T_n, K_n)$ に変換することによってデジタル的に表現している。この変換はあらかじめ人為的に行ってお

り、結果として得られた(数2)の差分方程式 $f(\Delta T_n, K_n)$ が非線形振動部11にプログラムとして内蔵されている。したがって、(数1)から(数2)への変換手段といったものは、この楽音合成装置には含まれるものではない。なお、(数1)、(数2)において、 $x, y, z$ あるいは $x_n, y_n, z_n$ は、具体的な物理量ではなく、純粋に数学的なそしてノンディメンジョン

(無次元)の変数であり、また三次元座標軸における変数ととらえてよいものである。(数2)の第1式ないし第3式はそれぞれ $x_n$ 、 $y_n$ 、 $z_n$ の1次導関数であることはいうまでもない。前記の $x_n$ 、 $y_n$ 、 $z_n$ のうち、変数 $y_n$ に対応するものが物理量としての楽音波形 $c$ として出力されるのであり、 $x_n$ 、 $z_n$ は特に出力には関与しない。 $\Delta T_n$ は時間差分項(イタレーション間隔)であり、これもノンディメンジョン(無次元)である。 $a$ 、 $b$ 、 $c$ は係数である。

【0013】以上のように構成された従来の楽音合成装置について動作説明をする。図15、図16はそれぞれ従来の楽音合成装置における楽音波形信号の波形図である。横軸、縦軸はそれぞれ時刻、振幅値に対応する軸である。

【0014】非線形振動部11は、すでに(数1)から変換済みの差分方程式 $f(\Delta T_n, K_n)$ である(数2)を演算するものである。1サンプリング時間(楽音波形信号の1サンプルを算出する時間で、後述する例では $(1/200) \times (1/240) \text{ sec} = 20.8 \mu \text{ sec}$ )に相当する時間間隔で発生するシステムクロック $SCK$ の発生毎に、(数2)を $m$ 回演算する( $m$ は自然数)。1回の演算に要する時間は1サンプリング時間を $m$ で割った時間になる。なお、 $m$ は任意に設定できる値であり、例えば、 $m=8$ とすると、1回の演算時間は、 $2.6 \mu \text{ sec}$ となる。またシステムクロック $SCK$ の周波数を $48 \text{ kHz}$ とする。これは楽音波形信号のピッチデータを $200 \text{ Hz}$ とし、1周期に対するサンプリング数を $240$ としたときに、 $200 \times 240 = 48000$ となるからである。システムクロック $SCK$ は遅延器16にも入力される。

【0015】ここで、乗算器13における摂動ゲイン $K_n$ を値0にした場合、つまり、乗算器13から非線形振動部11への摂動波形信号 $f y_n (=K_n (y_{i_n} - y_n))$ を無しにし、非線形振動部11に対する摂動を行わないようにした場合、発音フラグ $KON$ の発生後において、楽音波形 $c$ は図15に示すような波形になる(ただし、時間差分項 $\Delta T_n = 0.005$ )。この波形はある周期波形に対して、カオス特有の不規則性を付加したような波形となる。聴感的には、プラス系(トランペットやトロンボーンなどの金管楽器)の楽音のような高調波成分を豊富に含んだ音色(「オンショク」と読む)であり、かつピッチ感を極端に弱めたような音色である。つまり、時間軸方向の周期性が不分明で、音程(ドレミファソラシド)が分かりにくいものとなっている。

【0016】前述した文献Aにおいては、非線形振動部11が発生する波形を安定した周期波形(リミットサイクル)にするために、2つの方法を提案している。

【0017】第1の方法は、外的な周期波形(波形発生部15による)と非線形振動部11の出力波形との差分

値を用いて非線形振動部11を摂動する方法である。この方法をシミュレートするために、モード選択フラグ $MODE$ を値1にし、摂動ゲイン $K_n$ を値0.3に設定し、さらにピッチデータ $d$ を $200 \text{ Hz}$ にすることで、波形発生部15から $200 \text{ Hz}$ の正弦波形 $y_{h_n}$ を発生させる。選択器17はこの正弦波形 $y_{h_n}$ を基準波形 $y_{i_n}$ として減算器12に出力する。減算器12は選択器17からの基準波形 $y_{i_n}$ と非線形振動部11からの振動波形 $y_n$ の差分をとって周期波形 $b$ に相当する $(y_{i_n} - y_n)$ を乗算器13に出力する。乗算器13において固定値の摂動ゲイン $K_n = 0.3$ が乗算され、これにより乗算器13から $K_n (y_{i_n} - y_n)$ で表される摂動波形 $b'$ としての摂動波形信号 $f y_n$ が非線形振動部11に出力され、この摂動波形信号 $f y_n$ によって非線形振動部11を摂動する。その結果として、図16に示すような、図15に示す波形が波形発生部15からの正弦波形 $y_{h_n}$ ( $200 \text{ Hz}$ )の周期に対応する周期性をもつようになった楽音波形 $c$ が得られる。カオスの不規則性は若干残るものの、ほとんど安定した周期波形が得られ、音程がはっきりしたものとなり、リミットサイクルとなる。なお、図15の波形の振幅は、摂動によって減衰も受けている。

【0018】第2の方法は、遅延器16を用いて自己フィードバック系を構成する方法で、 $y_n$ を、遅延器16による遅延時間 $D$ だけずらせた $y_{n-D}$ とするものである。ここでの括弧は関数(ファンクション)であることを意味している(例えば、 $f(x)$ と同様の表現形態)。なお、楽音波形 $c$ のピッチデータ $d$ を $200 \text{ Hz}$ とすると、 $D = (1/200)$ 秒となる。これは、波形発生部15からの正弦波形 $y_{h_n}$ の1周期分に相当する。これで非線形振動部11の波形に対して正弦波形 $y_{h_n}$ の周期性に代えてそれに対応する周期性をもたせるのである。サンプリング周波数は $48 \text{ kHz}$ であるので、遅延器16の遅延段数は $48000/200 = 240$ 段となる。これは、正弦波の1周期内に240個入ることに相当する。この第2の方法を用いても、図16に示す波形のように安定した周期波形が得られる。

【0019】第1の方法と第2の方法とは、摂動波形 $b'$ としての摂動波形信号 $f y_n (=K_n (y_{i_n} - y_n))$ における要素 $y_{i_n}$ の生成方法が異なるだけであり、摂動作用を含めた差分方程式はいずれの方法でも(数3)で表すことができ、非線形振動部11と減算器12と乗算器13で構成される閉ループ状の回路は(数3)を演算するものである。(数3)では、 $f y_n = K_n * (y_{i_n} - y_n)$ とし、この $f y_n$ を $y_n$ の1次導関数に加算している。

【0020】

【数3】

(摂動作用を含めた差分方程式(レスラー))

$$\dot{x}_n = -y_n - z_n$$

$$\dot{y}_n = x_n + (a * y_n) + f y_n$$

$$\dot{z}_n = (b * x_n) - \{(-x_n + c) * z_n\}$$

$$f y_n = K_n * (y_{in} - y_n)$$

$$x_{n+1} = \dot{x}_n + (x_n * \Delta T)$$

$$y_{n+1} = \dot{y}_n + (y_n * \Delta T)$$

$$z_{n+1} = \dot{z}_n + (z_n * \Delta T)$$

( $\dot{x}_n$ ,  $\dot{y}_n$ ,  $\dot{z}_n$ の初期値を値0

$a=0.36$ 、 $b=0.4$ 、 $c=5.5$ とする)

【0021】次に、非線形振動部11が、(数5)に示  
す差分方程式  $f(\Delta T_n, K_n)$  をプログラムあるいは  
IC構成としてもち、その差分方程式を演算するもので

あるとする。

【0022】

【数4】

(ファンデアポールの方程式)

$$\frac{dx}{dt} = y - x^3 + x$$

$$\frac{dy}{dt} = -x$$

【0023】

【数5】



(ファンデアポールの方程式をオイラーの差分法で  
変換した差分方程式)

$$\dot{x}_n = y_n - x_n^3 + x_n$$

$$\dot{y}_n = -x_n$$

$$x_{n+1} = \dot{x}_n + (x_n * \Delta T)$$

$$y_{n+1} = \dot{y}_n + (y_n * \Delta T)$$

( $\dot{x}_n$ ,  $\dot{y}_n$  はそれぞれ  $x_n$ ,  $y_n$  の1次導関数)

【0024】(数4)は非線形の微分方程式の1つであるファンデアポールの方程式である。(数5)は数

(4)のファンデアポールの方程式を、オイラーの差分法を用いて差分形式に変換したものである。(数4)のファンデアポールの方程式はアナログ的表現であり、これを(数5)の差分方程式  $f(\Delta T, K)$  に変換することによってデジタル的に表現している。この変換はあらかじめ人為的に行っており、結果として得られた

(数5)の差分方程式  $f(\Delta T, K)$  が非線形振動部11にプログラムとして内蔵されている。(数4)か

ら(数5)への変換手段といったものは、この楽音合成装置には含まれるものではない。また、摂動波形信号  $f y_n$  ( $=K_n \cdot (y_{in} - y_n)$ ) による摂動作用を含めた差分方程式は(数6)で表すことができる。そして、この場合、非線形振動部11と減算器12と乗算器13で構成される閉ループ状の回路は(数6)を演算するのである。

【0025】

【数6】

(摂動作用を含めた差分方程式(ファンデアポール))

$$\dot{x}_n = y_n - x_n^3 + x_n$$

$$\dot{y}_n = -x_n + f y_n$$

$$f y_n = K_n * (y_{in} - y_n)$$

$$x_{n+1} = \dot{x}_n + (x_n * \Delta T)$$

$$y_{n+1} = \dot{y}_n + (y_n * \Delta T)$$

( $x_n$ ,  $y_n$ ,  $z_n$  の初期値を値0とする)

【0026】(数6)に基づいて制御される楽音合成装置において、モード選択フラグMODEを値1として波形発生部15からの正弦波形  $y_{in}$  を基準波形  $y_{in}$  として選択し、乗算器13における摂動ゲイン  $K_n$  を値0とすると、楽音波形  $c$  は図17に示すような波形となる。また、モード選択フラグMODEを値1とし、摂動ゲイン  $K_n$  を値0.7とすると、図18に示すような楽

音波形  $c$  が得られる。

【0027】以上のように、従来の楽音合成装置は、非線形振動部11の自励振動系に対して基準波形  $y_{in}$  を融合することにより、非線形振動部11が有するリミットサイクルを基準波形  $y_{in}$  の周期性にマッチングする状態で抽出し、新たな音色(オンショク)を合成するのである。

## 【0028】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、上述した従来の楽音合成装置では、ピッチデータ d (周波数) の変更によって楽音波形 c の基本ピッチを変更しても、楽音波形 c に重畳されたリミットサイクルの周波数は常に一定しているので、オーボエや人の声などのいわゆる固定フォルマント系楽音はシミュレートできても、トランペット・サキソフォン・ピアノ・ギターなどの移動フォルマント系の楽音をシミュレートできないという問題点を有していた。なお、フォルマントとは、楽器の音色を特徴付けるスペクトル包絡の形状 (横軸に周波数、縦軸に音量) のことであり、固定フォルマントとは、そのスペクトル包絡の形状が音程を変えても変化しないものであり、移動フォルマントとは、音程を変えるとスペクトル包絡の形状が変化するものである。

【0029】例えば、トランペットなどの金管楽器では、楽音のピッチ (管長で変更) に応じて唇の締め具合を変化させることにより、基本ピッチに対応する基準の周期波形に重畳される唇の固有振動の周波数 (基本ピッチより高い周波数) は基本ピッチに準じて変化する。また、サキソフォンなどにおいては、低い音域では通常、バリトンサキソフォン (あるいはテナーサキソフォン) の音色が用いられ、高い音域ではソプラノサキソフォン (あるいはアルトサキソフォン) の音色が用いられるが、バリトンサキソフォンは大きなリード (リード自体の固有振動周波数が低いリード) が用いられるので、管とリードの共鳴によって形成される基準の周期波形に重畳されるリードの固有振動の周波数 (基本ピッチより高い周波数) は、ソプラノサキソフォンのリードの固有振動よりも低い周波数になる。即ち、移動フォルマント系の楽音においては、楽音波形のピッチに応じて、楽音波形に重畳されるメジャーな高調波成分 (リミットサイクルに対応) の周波数が変化するという特徴を有する。

【0030】また、上述した従来の楽音合成装置では、図 16 や図 18 に示すように、楽音波形信号の立ち上がり以降、波形形状 (音色) がほぼ一定した波形になるので、立ち上がりが非周期的で立ち上がり以降次第に周期性を帯びてくるといった自然楽音特有の時間的音色変化をシミュレートできないといった問題点を有していた。例えば、ピアノ音の立ち上がりにおいては、ハンマーが弦に当たる際の衝撃音 (非周期的であり高調波成分を多く含む波形) が発生し、立ち上がり以降は弦の振動音 (周期的な波形) が成長してくる。またトランペットなどの金管楽器音の立ち上がりにおいては、唇 (リード) のみの固有振動 (基本ピッチとは異なる周波数の振動) が発生し、立ち上がり以降は管と唇の共鳴音 (基本ピッチ) が成長してくる。即ち、自然楽音においては、立ち上がりは楽音波形信号のピッチとは異なる周波数の波形もしくは非周期的な波形が発生し、立ち上がり以降は基本ピッチの周期波形になる。

## 【0031】

【課題を解決するための手段】上記の問題点を解決するために、本発明に係る楽音合成装置は、非線形微分方程式で記述される自励振動系を差分形式にデジタルシミュレートした非線形振動手段を楽音波形のピッチに相当する周期を有した周期波形で摂動させることにより非線形振動手段の振動を安定化させ所望の楽音波形を合成させるに当たり、所望の楽音波形のピッチ要素に応じて非線形振動手段の差分方程式の時間差分項  $\Delta T$  の値を変更するように構成してある。これによって、非線形振動手段の演算上の時間軸を圧縮伸張させ、非線形振動手段が発生する固有振動 (リミットサイクル) の周波数を変化させ、自然楽器音の音色の音高特性をシミュレートする。あるいは、時間要素に応じて非線形振動手段の摂動ゲイン  $K$  を変化させるように構成してある。これによって、楽音波形の安定度合い (周期性の度合い) 及び楽音波形に重畳されるリミットサイクルの量を調整し、楽音波形の立ち上がりが不安定周期状態から徐々に安定周期状態に遷移していくといった自然楽器特有の過渡特性をシミュレートする。

## 【0032】

【発明の実施の形態】以下、本発明に係る請求項 1 ないし請求項 9 の楽音合成装置の構成を説明する。理解を容易にするため図 1 ~ 図 9 を用いて説明するが、この図示形態によって本発明は限定されるものではない。

【0033】本発明に係る請求項 1 の楽音合成装置は、図 1 に示すように、非線形微分方程式で記述される自励振動系を差分形式にデジタルシミュレートした非線形振動手段 a を楽音波形のピッチに相当する周期を有した周期波形 b で摂動させることにより非線形振動手段 a の振動を安定化させ所望の楽音波形 c を合成させる楽音合成装置において、前記非線形振動手段 a が演算する差分方程式 f ( $\Delta T$  ) の時間差分項  $\Delta T$  を楽音波形のピッチ要素 d に応じて制御する手段 e を有していることを特徴としている。所望の楽音波形のピッチ要素 d に応じて非線形振動手段 a の差分方程式 f ( $\Delta T$  ) の時間差分項  $\Delta T$  の値を変更することにより非線形振動手段 a の演算上の時間軸を圧縮伸張させ、非線形振動手段 a が発生する固有振動 (リミットサイクル) の周波数を変化させ、これによって自然楽器音の音色の音高特性をシミュレートすることができる。

【0034】本発明に係る請求項 2 の楽音合成装置は、図 2 に示すように、非線形微分方程式で記述される自励振動系を差分形式にデジタルシミュレートした非線形振動手段 a を楽音波形のピッチに相当する周期を有した周期波形 b で摂動させることにより非線形振動手段 a の振動を安定化させ所望の楽音波形 c を合成させる楽音合成装置において、前記摂動の摂動ゲイン  $K$  を時間要素 f に応じて制御する手段 g を有していることを特徴としている。時間要素 f に応じて非線形振動手段 a の摂動ゲイ

ン $K_0$ 。を変化させることにより、楽音波形の安定度合い（周期性の度合い）及び楽音波形に重畳されるリミットサイクルの量を調整し、楽音波形 $c$ の立ち上がりが不安定周期状態から徐々に安定周期状態に移移していくといった自然楽器特有の過渡特性をシミュレートすることができる。

【0035】本発明に係る請求項3の楽音合成装置は、上記請求項1をより具体的に示すものであって、図3に示すように、非線形微分方程式で記述される自励振動系を差分形式にデジタルシミュレートした非線形振動手段 $a$ と、基準波形を発生する波形発生手段 $h$ と、前記波形発生手段 $h$ が発生する基準波形 $y_i$ 。と前記非線形振動手段 $a$ が出力する振動波形 $y$ 。との差分（ $y_i - y$ 。）をとることに基づいて非線形振動手段 $a$ を摂動する摂動波形 $b'$ を発生する減算手段 $i$ と、所望の楽音波形 $c$ のピッチ要素 $d$ に応じて前記非線形振動手段 $a$ の時間差分項 $\Delta T$ 。の値を変更することにより非線形振動手段 $a$ の固有振動の周波数を制御する固有振動周波数制御手段 $j$ とを備えていることを特徴としている。非線形振動手段 $a$ を摂動するための摂動波形 $b'$ を発生するのには、波形発生手段 $h$ による基準波形 $y_i$ 。と非線形振動手段 $a$ が出力する振動波形 $y$ 。とを減算手段 $i$ に導いてその差分（ $y_i - y$ 。）をとることに基づいて摂動波形 $b'$ を発生させている。そして、固有振動周波数制御手段 $j$ が楽音波形 $c$ のピッチ要素 $d$ に応じて非線形振動手段 $a$ の差分方程式 $f(\Delta T, K_0)$ の時間差分項 $\Delta T$ 。の値を変更することにより非線形振動手段 $a$ の演算上の時間軸を圧縮伸張させ、非線形振動手段 $a$ が発生する固有振動（リミットサイクル）の周波数を変化させ、これによって自然楽器音の音色の音高特性をシミュレートすることができる。

【0036】本発明に係る請求項4の楽音合成装置は、上記請求項1をより具体的に示すものであって、図4に示すように、非線形微分方程式で記述される自励振動系を差分形式にデジタルシミュレートした非線形振動手段 $a$ と、前記非線形振動手段 $a$ が出力する振動波形 $y$ 。を所定時間遅延させた後に基準波形 $y_i$ 。として出力する遅延手段 $p$ と、前記遅延手段 $p$ が発生する基準波形 $y_i$ 。と前記非線形振動手段 $a$ が出力する振動波形 $y$ 。との差分（ $y_i - y$ 。）をとることに基づいて非線形振動手段 $a$ を摂動する摂動波形 $b'$ を発生する減算手段 $i$ と、所望の楽音波形 $c$ のピッチ要素 $d$ に応じて前記非線形振動手段 $a$ の時間差分項 $\Delta T$ 。の値を変更することにより非線形振動手段 $a$ の固有振動の周波数を制御する固有振動周波数制御手段 $j$ とを備えていることを特徴としている。非線形振動手段 $a$ を摂動するための摂動波形 $b'$ を発生するのには、非線形振動手段 $a$ が出力する振動波形 $y$ 。を遅延手段 $p$ により遅延させて生成した基準波形 $y_i$ 。と非線形振動手段 $a$ が出力する振動波形 $y$ 。とを減算手段 $i$ に導いてその差分（ $y_i - y$ 。）をとる

ことに基づいて摂動波形 $b'$ を発生させている。そして、固有振動周波数制御手段 $j$ が楽音波形 $c$ のピッチ要素 $d$ に応じて非線形振動手段 $a$ の差分方程式 $f(\Delta T, K_0)$ の時間差分項 $\Delta T$ 。の値を変更することにより非線形振動手段 $a$ の演算上の時間軸を圧縮伸張させ、非線形振動手段 $a$ が発生する固有振動（リミットサイクル）の周波数を変化させ、これによって自然楽器音の音色の音高特性をシミュレートすることができる。

【0037】本発明に係る請求項5の楽音合成装置は、上記請求項2をより具体的に示すものであって、図5に示すように、非線形微分方程式で記述される自励振動系を差分形式にデジタルシミュレートした非線形振動手段 $a$ と、基準波形 $y_i$ 。を発生する波形発生手段 $h$ と、前記波形発生手段 $h$ が発生する基準波形 $y_i$ 。と前記非線形振動手段 $a$ が出力する振動波形 $y$ 。との差分（ $y_i - y$ 。）をとることに基づいて非線形振動手段 $a$ を摂動する摂動波形 $b'$ を発生する減算手段 $i$ と、発音開始を起点として時間経過を計時する計時手段 $q$ と、前記計時手段 $q$ が計時した時間データ $D_t$ に応じて前記減算手段 $i$ が出力する摂動波形 $b'$ の摂動ゲイン $K_0$ を制御する摂動ゲイン制御手段 $r$ とを備えていることを特徴としている。非線形振動手段 $a$ を摂動するための摂動波形 $b'$ を発生するのには、波形発生手段 $h$ による基準波形 $y_i$ 。と非線形振動手段 $a$ が出力する振動波形 $y$ 。とを減算手段 $i$ に導いてその差分（ $y_i - y$ 。）をとることに基づいて摂動波形 $b'$ を発生させている。そして、計時手段 $q$ が発音開始時点から計時した時間データ $D_t$ 即ち時間要素 $f$ に応じて減算手段 $i$ が出力する非線形振動手段 $a$ の差分方程式 $f(\Delta T, K_0)$ に対する摂動波形 $b'$ の摂動ゲイン $K_0$ を変化させることにより、楽音波形の安定度合い（周期性の度合い）及び楽音波形に重畳されるリミットサイクルの量を調整し、楽音波形 $c$ の立ち上がりが不安定周期状態から徐々に安定周期状態に移移していくといった自然楽器特有の過渡特性をシミュレートすることができる。

【0038】本発明に係る請求項6の楽音合成装置は、上記請求項2をより具体的に示すものであって、図6に示すように、非線形微分方程式で記述される自励振動系を差分形式にデジタルシミュレートした非線形振動手段 $a$ と、前記非線形振動手段 $a$ が出力する振動波形 $y$ 。を所定時間遅延させた後に基準波形 $y_i$ 。として出力する遅延手段 $p$ と、前記遅延手段 $p$ が発生する基準波形 $y_i$ 。と前記非線形振動手段 $a$ が出力する振動波形 $y$ 。との差分（ $y_i - y$ 。）をとることに基づいて非線形振動手段 $a$ を摂動する摂動波形 $b'$ を発生する減算手段 $i$ と、発音開始を起点として時間経過を計時する計時手段 $q$ と、前記計時手段 $q$ が計時した時間データ $D_t$ に応じて前記減算手段 $i$ が出力する摂動波形 $b'$ の摂動ゲイン $K_0$ を制御する摂動ゲイン制御手段 $r$ とを備えていることを特徴としている。非線形振動手段 $a$ を摂動するため

の振動波形  $b'$  を発生するのに、非線形振動手段  $a$  が出力する振動波形  $y$ 。を遅延手段  $p$  により遅延させて生成した基準波形  $y_i$ 。と非線形振動手段  $a$  が出力する振動波形  $y$ 。とを減算手段  $i$  に導いてその差分 ( $y_i - y$ 。 ) をとることに基づいて振動波形  $b'$  を発生させている。そして、計時手段  $q$  が発音開始時点から計時した時間データ  $D_i$ 、即ち時間要素  $f$  に応じて減算手段  $i$  が出力する非線形振動手段  $a$  の差分方程式  $f(\Delta T_i, K_i)$  に対する振動波形  $b'$  の振動ゲイン  $K_i$  を変化させることにより、楽音波形の安定度合い (周期性の度合い) 及び楽音波形に重畳されるリミットサイクルの量を調整し、楽音波形  $c$  の立ち上がりが不安定周期状態から徐々に安定周期状態に移行していくといった自然楽器特有の過渡特性をシミュレートすることができる。

【0039】本発明に係る請求項7の楽音合成装置は、上記請求項1および請求項2を合成してより具体的に示すものであって、図7に示すように、非線形微分方程式で記述される自励振動系を差分形式にデジタルシミュレートした非線形振動手段  $a$  と、基準波形を発生する波形発生手段  $h$  と、前記波形発生手段  $h$  が発生する基準波形  $y_i$ 。と前記非線形振動手段  $a$  が出力する振動波形  $y$ 。との差分 ( $y_i - y$ 。 ) をとることに基づいて非線形振動手段  $a$  を振動する振動波形  $b'$  を発生する減算手段  $i$  と、所望の楽音波形  $c$  のピッチ要素  $d$  に応じて前記非線形振動手段  $a$  の時間差分項  $\Delta T_i$  の値を変更することにより非線形振動手段  $a$  の固有振動の周波数を制御する固有振動周波数制御手段  $j$  と、発音開始を起点として時間経過を計時する計時手段  $q$  と、前記計時手段  $q$  が計時した時間データ  $D_i$  に応じて前記減算手段  $i$  が出力する振動波形  $b'$  の振動ゲイン  $K_i$  を制御する振動ゲイン制御手段  $r$  とを備えていることを特徴としている。非線形振動手段  $a$  を振動するための振動波形  $b'$  を発生するのに、波形発生手段  $h$  による基準波形  $y_i$ 。と非線形振動手段  $a$  が出力する振動波形  $y$ 。とを減算手段  $i$  に導いてその差分 ( $y_i - y$ 。 ) をとることに基づいて振動波形  $b'$  を発生させている。そして、固有振動周波数制御手段  $j$  が楽音波形  $c$  のピッチ要素  $d$  に応じて非線形振動手段  $a$  の差分方程式  $f(\Delta T_i, K_i)$  の時間差分項  $\Delta T_i$  の値を変更することにより非線形振動手段  $a$  の演算上の時間軸を圧縮伸張させ、非線形振動手段  $a$  が発生する固有振動 (リミットサイクル) の周波数を変化させ、これによって自然楽器音の音色の音高特性をシミュレートすることができる。さらに、計時手段  $q$  が発音開始時点から計時した時間データ  $D_i$ 、即ち時間要素  $f$  に応じて減算手段  $i$  が出力する非線形振動手段  $a$  の差分方程式  $f(\Delta T_i, K_i)$  に対する振動波形  $b'$  の振動ゲイン  $K_i$  を変化させることにより、楽音波形の安定度合い (周期性の度合い) 及び楽音波形に重畳されるリミットサイクルの量を調整し、楽音波形  $c$  の立ち上がりが不安定周期状態から徐々に安定周期状態に移行していくといった

自然楽器特有の過渡特性をシミュレートすることができる。

【0040】本発明に係る請求項8の楽音合成装置は、上記請求項1および請求項2を合成してより具体的に示すものであって、図8に示すように、非線形微分方程式で記述される自励振動系を差分形式にデジタルシミュレートした非線形振動手段  $a$  と、前記非線形振動手段  $a$  が出力する振動波形  $y$ 。を所定時間遅延させた後に基準波形  $y_i$ 。として出力する遅延手段  $p$  と、前記遅延手段  $p$  が発生する基準波形  $y_i$ 。と前記非線形振動手段  $a$  が出力する振動波形  $y$ 。との差分 ( $y_i - y$ 。 ) をとることに基づいて非線形振動手段  $a$  を振動する振動波形  $b'$  を発生する減算手段  $i$  と、発音開始を起点として時間経過を計時する計時手段  $q$  と、前記計時手段  $q$  が計時した時間データ  $D_i$  に応じて前記減算手段  $i$  が出力する振動波形  $b'$  の振動ゲイン  $K_i$  を制御する振動ゲイン制御手段  $r$  と、所望の楽音波形  $c$  のピッチ要素  $d$  に応じて前記非線形振動手段  $a$  の時間差分項  $\Delta T_i$  の値を変更することにより非線形振動手段  $a$  の固有振動の周波数を制御する固有振動周波数制御手段  $j$  とを備えていることを特徴としている。非線形振動手段  $a$  を振動するための振動波形  $b'$  を発生するのに、非線形振動手段  $a$  が出力する振動波形  $y$ 。を遅延手段  $p$  により遅延させて生成した基準波形  $y_i$ 。と非線形振動手段  $a$  が出力する振動波形  $y$ 。とを減算手段  $i$  に導いてその差分 ( $y_i - y$ 。 ) をとることに基づいて振動波形  $b'$  を発生させている。そして、計時手段  $q$  が発音開始時点から計時した時間データ  $D_i$ 、即ち時間要素  $f$  に応じて減算手段  $i$  が出力する非線形振動手段  $a$  の差分方程式  $f(\Delta T_i, K_i)$  に対する振動波形  $b'$  の振動ゲイン  $K_i$  を変化させることにより、楽音波形の安定度合い (周期性の度合い) 及び楽音波形に重畳されるリミットサイクルの量を調整し、楽音波形  $c$  の立ち上がりが不安定周期状態から徐々に安定周期状態に移行していくといった自然楽器特有の過渡特性をシミュレートすることができる。さらに、固有振動周波数制御手段  $j$  が楽音波形  $c$  のピッチ要素  $d$  に応じて非線形振動手段  $a$  の差分方程式  $f(\Delta T_i, K_i)$  の時間差分項  $\Delta T_i$  の値を変更することにより非線形振動手段  $a$  の演算上の時間軸を圧縮伸張させ、非線形振動手段  $a$  が発生する固有振動 (リミットサイクル) の周波数を変化させ、これによって自然楽器音の音色の音高特性をシミュレートすることができる。

【0041】本発明に係る請求項9の楽音合成装置は、上記請求項1および請求項2を合成してより具体的に示すものであって、図9に示すように、非線形微分方程式で記述される自励振動系を差分形式にデジタルシミュレートした非線形振動手段  $a$  と、第1の基準波形  $y_h$ 。を発生する波形発生手段  $h$  と、前記非線形振動手段  $a$  が出力する振動波形  $y$ 。を所定時間遅延させた後に第2の基準波形  $y$ 。 ( $t - D$ ) として出力する遅延手段  $p$  と、前

記第 1 の基準波形  $y_h$ 。と前記第 2 の基準波形  $y_i$ 。(  $t-D$  ) とを切り換えて基準波形  $y_i$ 。として選択的に出力する選択手段  $s$  と、前記選択手段  $s$  が発生する基準波形  $y_i$ 。と前記非線形振動手段  $a$  が出力する振動波形  $y$ 。との差分 ( $y_i - y$ 。) をとることに基づいて非線形振動手段  $a$  を振動する振動波形  $b'$  を発生する減算手段  $i$  と、発音開始を起点として時間経過を計時する計時手段  $q$  と、前記計時手段  $q$  が計時した時間データ  $D_t$  に応じて前記減算手段  $i$  が出力する振動波形  $b'$  の振動ゲイン  $K$ 。を制御する振動ゲイン制御手段  $r$  と、所望の楽音波形  $c$  のピッチ要素  $d$  に応じて前記非線形振動手段  $a$  の時間差分項  $\Delta T$ 。の値を変更することにより非線形振動手段  $a$  の固有振動の周波数を制御する固有振動周波数制御手段  $j$  とを備えていることを特徴としている。選択手段  $s$  において波形発生手段  $h$  からの第 1 の基準波形  $y_h$ 。と遅延手段  $p$  からの第 2 の基準波形  $y_i$ 。(  $t-D$  ) とのうちいずれかを基準波形  $y_i$ 。として選択し、減算手段  $i$  に出力する。非線形振動手段  $a$  を振動するための振動波形  $b'$  を発生するのに、非線形振動手段  $a$  が出力する振動波形  $y$ 。を選択手段  $s$  により選択した基準波形  $y_i$ 。と非線形振動手段  $a$  が出力する振動波形  $y$ 。とを減算手段  $i$  に導いてその差分 ( $y_i - y$ 。) をとることに基づいて振動波形  $b'$  を発生させている。そして、計時手段  $q$  が発音開始時点から計時した時間データ  $D_t$  即ち時間要素  $f$  に応じて減算手段  $i$  が出力する非線形振動手段  $a$  の差分方程式  $f$  (  $\Delta T$ 。 ,  $K$ 。 ) に対する振動波形  $b'$  の振動ゲイン  $K$ 。を変化させることにより、楽音波形の安定度合い ( 周期性の度合い ) 及び楽音波形に重畳されるリミットサイクルの量を調整し、楽音波形  $c$  の立ち上がりが不安定周期状態から徐々に安定周期状態に遷移していくといった自然楽器特有の過渡特性をシミュレートすることができる。さらに、固有振動周波数制御手段  $j$  が楽音波形  $c$  のピッチ要素  $d$  に応じて非線形振動手段  $a$  の差分方程式  $f$  (  $\Delta T$ 。 ,  $K$ 。 ) の時間差分項  $\Delta T$ 。の値を変更することにより非線形振動手段  $a$  の演算上の時間軸を圧縮伸張させ、非線形振動手段  $a$  が発生する固有振動 ( リミットサイクル ) の周波数を変化させ、これによって自然楽器音の音色の音高特性をシミュレートすることができる。

【 0 0 4 2 】 以下、本発明に係る楽音合成装置の具体的な実施の形態について、図面に基づいて詳細に説明する。

【 0 0 4 3 】 図 1 0 は本発明の実施の形態における楽音合成装置の構成を示すブロック図である。図 1 0 において、従来の技術に係る図 1 4 におけるのと同符号は同一構成を示し、再度説明すると、1 1 はマイコンや DSP ( デジタルシグナルプロセッサ ) などのプログラマブルなプロセッサを用いて構成されるもので非線形の自励振動系に相当する差分方程式  $f$  (  $\Delta T$ 。 ,  $K$ 。 ) の演算を行う非線形振動部、1 2 は選択器 1 7 の出力  $y_i$ 。か

ら非線形振動部 1 1 の出力  $y$ 。を減算する減算器、1 3 は減算器 1 2 の出力である周期波形  $b$  に相当する ( $y_i - y$ 。) に対して時間要素に応じて可変の振動ゲイン  $K$ 。を乗算する乗算器、1 4 は例えば電子鍵盤楽器の鍵盤を押したときに生じる発音フラグ K O N ( 「キーオン」 ) が入力されている間は非線形振動部 1 1 の出力を楽音波形  $c$  として出力するゲート回路、1 5 は予めメモリに記憶された基準波形 ( 正弦波形 )  $y_h$ 。を発音フラグ K O N の入力に同期して読み出して出力する波形発生部、1 6 はゲート回路 1 4 の出力  $y$ 。をピッチデータ  $d$  に相当する時間分だけ遅延させて出力  $y$ 。(  $t-D$  ) として出力する遅延器、1 7 はモード選択フラグ M O D E が値 0 のときに遅延器 1 6 の出力  $y$ 。(  $t-D$  ) を減算器 1 2 に基準波形  $y_i$ 。として送出し、モード選択フラグ M O D E が値 1 のときに波形発生部 1 5 の出力  $y_h$ 。を減算器 1 2 に基準波形  $y_i$ 。として送出する選択器、S C K は非線形振動部 1 1、遅延器 1 6 および後述するカウンタ 1 9 に入力されるシステムクロックである。発音フラグ K O N は例えば電子鍵盤楽器の鍵盤を押したときの発音時には値 1 となり、鍵盤の押しを解除したときの消音時に値 0 となる。ゲート回路 1 4 から出力される楽音波形信号は図示しない D / A 変換器、増幅器を含むサウンドシステムを介してスピーカから音声出力される。

【 0 0 4 4 】 本実施の形態においては、以上の構成に加えて次のような構成を備えている。図 1 0 において、1 8 はピッチデータ  $d$  ( 例えば鍵盤楽器の場合は押す鍵盤の位置によって定まる ) をアドレスとして内部に記憶された時間差分項  $\Delta T$ 。の対応する値を読み出す固有振動周波数制御用テーブル、1 9 は発音フラグ K O N の発生の瞬間にリセットされ、その後、システムクロック S C K の発生毎にカウント値を 1 ずつインクリメントし、カウント値が最大値として設定してある例えば 4 0 9 5

(  $= 2^{12} - 1$  ) に達した時点で、その最大値 4 0 9 5 を保持する計時用カウンタ、2 0 は計時用カウンタ 1 9 のカウント値である時間データ  $D_t$  をアドレスとして内部に記憶された振動ゲイン  $K$ 。の値を読み出す振動ゲイン制御用テーブルである。固有振動周波数制御用テーブル 1 8 においては、例えば後出の ( 表 1 ) に示すように、ピッチデータ  $d$  と時間差分項  $\Delta T$ 。とが対応付けられている。振動ゲイン制御用テーブル 2 0 においては、例えば後出の ( 表 2 ) に示すように、計時用カウンタ 1 9 のカウント値と振動ゲイン  $K$ 。とが対応付けられている。これらのテーブルはマイコンの R O M に格納されている。( 表 1 )、( 表 2 ) は後述するようにサキソフォン属に係るものであるが、このようなテーブルが適用する楽器の種類数だけ用意されていて、それを選択するようになっている。この楽音合成装置は、例えば 1 チップのデバイスで構成することができる。

【 0 0 4 5 】 図 1 1、図 1 2、図 1 3 は本発明の実施の

形態に係る楽音合成装置における楽音波形信号の波形図である。これらの図において、横軸、縦軸はそれぞれ時刻、振幅値に対応する軸である。

【0046】 以上のように構成された楽音合成装置の動作について以下に説明する。基本的な合成動作は従来の楽音合成装置と同様であるので、相違点のみについて説明する。なお、選択器 17 に対するモード選択フラグ MODE は値 0 でも値 1 でもほぼ同様の特性をもった楽音波形 c が得られるので、ここではモード選択フラグ MODE を値 1 にした場合、即ち波形発生部 15 の出力 y h  
10 を選択器 17 で選んで振動波形信号 f y。の要素 y i。として動作させた場合についてのみ説明する。

【0047】 まず、非線形振動部 11 が (数 6) に示すファンデアポールの方程式に対応する振動作用を含めた差分方程式  $f(\Delta T, K)$  を演算する機能を有しているとする。

【0048】 従来の楽音合成装置では時間差分項  $\Delta T$  の値を 0.005 として演算し、振動ゲイン  $K$  が値 0 の場合、図 17 に示すような楽音波形 (リミットサイクル) が得られた。

【0049】 システム構成を複雑にせずに、リミットサイクルの周波数をピッチデータ d に応じて変化させるためには、システム全体の動作周波数を常に一定とする、即ちシステムクロック SCK の発生タイミングを時間的に変更させないような方法をとる必要がある。そのための方法としては、例えば非線形振動部 11 を、正弦波を発生するような 2 次の線形フィルタのような線形システムで構成する場合においては、フィルタの係数を調整して発振周波数を変更する手法が考えられる。

【0050】 しかし、本発明の本実施の形態においては、非線形振動部 11 は非線形システムであるので、フィルタの係数調整で一意的にリミットサイクル周波数を調整することが困難である。なぜならば、非線形システムの場合、リミットサイクルのモード (周波数の違いも含む) が係数の連続的な変化に対して飛び飛びに変化する (連続的に変化しない) ものであり、また非線形システムの種類によっては突然にカオス状態になるものもあるからである。

【0051】 そこで、本発明の実施の形態においては、固有振動周波数制御用テーブル 18 においてピッチデータ d に応じて時間差分項  $\Delta T$  の値を制御することにより、非線形振動部 11 が生成するリミットサイクルのみの時間スケールを変化させることとしている。

【0052】 従来の場合の図 17、図 18 においては、時間差分項  $\Delta T$  を値 0.005 としていたが、これに対して、本実施の形態において、時間差分項  $\Delta T$  を値 0.02 とし、振動ゲイン  $K$  を値 0 とすると、図 11 に示す楽音波形が得られる。また時間差分項  $\Delta T$  の値 0.02 のままで、振動ゲイン  $K$  を値 0.7 とすると、図 12 に示す楽音波形が得られる。図 12 と図 18 とを比較すると、明らかに図 12 の方が、周波数の高いリミットサイクルが基準波形 (200 Hz の正弦波) に重畳されていることがわかる。従って、楽音波形のピッチに応じてリミットサイクルの周波数を制御するためには、(表 1) に示すような、ピッチデータ d と時間差分項  $\Delta T$  を対応付けるテーブルを設ければよい。

【0053】

【表 1】

固有振動周波数制御用テーブル (18)	
ピッチ (Hz)	ピッチデータ 時間差分項 $\Delta T_n$
32.70	24 0.00273
34.65	25 0.00281
36.71	26 0.00289
38.89	27 0.00297
41.20	28 0.00306
...	...
87.31	41 0.00445
92.50	42 0.00459
98.00	43 0.00472
103.83	44 0.00486
110.00	45 0.00500
116.54	46 0.00515
123.47	47 0.00530
130.81	48 0.00545
138.59	49 0.00561
146.83	50 0.00578
155.56	51 0.00595
164.81	52 0.00612
174.61	53 0.00630
185.00	54 0.00648
196.00	55 0.00667
207.65	56 0.00687
220.00	57 0.00707
233.08	58 0.00728
246.94	59 0.00749
261.63	60 0.00771
277.18	61 0.00794
293.66	62 0.00817
311.13	63 0.00841
329.63	64 0.00866
349.23	65 0.00891
369.99	66 0.00917
392.00	67 0.00944
415.30	68 0.00972
440.00	69 0.01000
466.16	70 0.01029
493.88	71 0.01059
523.25	72 0.01091
554.37	73 0.01122
...	...
1661.22	86 0.01943
1760.00	87 0.02000
1864.66	88 0.02059
1975.53	89 0.02119
2093.00	90 0.02181

【0054】表1はサキソフォン属の音色特性をシミュレートするための変換特性を有したものである。110 Hz 付近はバリトンサキソフォンの音色が多用される音域であり、ピッチが上がるにつれテナーサキソフォン、アルトサキソフォンとなり、そして440 Hz 付近はソプラノサキソフォンの音色が多用される音域となる。即ち、音域（ピッチ）によって、多用されるサキソフォンの種類が異なる。

【0055】そこで、各種サキソフォンの音色を特徴付けるメジャーな要素であるリードの固有振動数（基本ピッチより高い振動モードのもの）に着目し、これを音域によって変更することにより、全音域に亘るサキソフォンの特徴（音高特性）をシミュレートすることができる。そのために、本発明の実施の形態においては、（表1）に示すように、非線形振動部11が生成するリミットサイクルの周波数（上記リードの固有振動数に対応するもの）を決定する時間差分項  $\Delta T_n$  を音域（ピッチ）

に応じて変更するように構成したのである。

【0056】なお、（表1）のようにピッチデータの値が大きくなるにつれて時間差分項  $\Delta T_n$  の値が連続的に大きくなる特性にするのではなく、例えば、あるピッチデータの値において不連続的に大きくなる、即ち階段状の特性にしてもよい。また、時間差分項  $\Delta T_n$  とリミットサイクルの周波数の関係は、非線形振動部11が演算する差分方程式  $f(\Delta T_n, K_n)$  の種類等によって異なるものであり、また、實際上、サキソフォンのリードの固有振動数自体も個体差があるものなので、理論的に一意に決定できるものではない。固有振動周波数制御用テーブル18は適用する楽器の種類数だけ用意されていて、それを選択するようになっている。従って、時間差分項  $\Delta T_n$  とリミットサイクルの周波数の関係は、自然楽器音及び合成された楽音波形の計測、試聴によって、試行錯誤的に決定することになる。

【0057】次に、非線形振動部11が（数3）に示す

レスラーの方程式に対応する摂動作用を含めた差分方程式  $f(\Delta T_n, K_n)$  を演算する機能を有しているとす

【0058】従来の楽音合成装置では、楽音波形の立ち上がり以降、摂動ゲイン  $K_n$  の値を 0.3 に固定して合成していたのに対し、本発明の実施の形態においては、計時用カウンタ 19 が発音フラグ K O N の発生以降、システムクロック S C K の発生タイミングに応じてカウント値を値 0 から 1 ずつインクリメントし、(表 2) の変換特性を有した摂動ゲイン制御用テーブル 20 が計時用カウンタ 19 のカウント値に応じて摂動ゲイン  $K_n$  を値 0 から値 0.3 に向けて徐々に増大させ、値 0.3 に到達した後は値 0.3 を保持するように合成する。

【0059】

【表 2】

摂動ゲイン制御用テーブル (20)	
カウント値	摂動ゲイン $K_n$
0	0
1	0.00015
2	0.00030
3	0.00045
4	0.00060
5	0.00075
6	0.00090
7	0.00105
8	0.00120
9	0.00135
⋮	⋮
1995	0.29925
1996	0.29940
1997	0.29955
1998	0.29970
1999	0.29985
2000	0.30000
2001	0.30000
2002	0.30000
⋮	⋮
4093	0.30000
4094	0.30000
4095	0.30000

【0060】表 2 によれば、計時用カウンタ 19 のカウント値が値 2000 になるまで摂動ゲイン  $K_n$  を一定のステップ (0.00015) で値 0 から値 0.3 まで徐々に増大させ、カウント値が値 2000 に達した時点で

摂動ゲイン  $K_n$  を値 0.3 に保持するといった特性である。この特性に従って摂動ゲイン  $K_n$  を時間的に制御することにより、楽音波形は図 13 に示すような波形となる。即ち、楽音波形が立ち上がりから 2000 ポイント分 (基本ピッチである 200 Hz の周期波形に換算して約 8 波形分であり (200 × (2000 / 4800) ≒ 8.33)、図 13 における時刻  $t_a$ ) になるまでは、基本ピッチの周期性が弱く、かつ基本ピッチより周期が短い不安定な周期成分が現れる。そして時刻  $t_a$  以降は基本ピッチの周期性の強い安定した周期波形となる。

【0061】なお、摂動ゲイン制御用テーブル 20 は、(表 2) に示すように計時用カウンタ 19 のカウント値に応じて摂動ゲイン  $K_n$  の値が連続的に変化するような特性としたが、例えばカウント値 2000 において、時間差分項  $\Delta T_n$  がステップ的に変化するような特性としてもよい。なお、摂動ゲイン制御用テーブル 20 は、適用する楽器の種類数だけ用意されていて、それを選択するようになっている。

【0062】以上のように、本発明の実施の形態によれば、固有振動周波数制御用テーブル 18 が、楽音波形のピッチが高くなるにつれて非線形振動部 11 が発生するリミットサイクルの周波数を段階的に高くすることにより、全音域に亘って例えばサキソフォン属の音色 (いわゆる移動フォルマント系の音色) をシミュレートすることができる。

【0063】なお、固有振動周波数制御用テーブル 18 に記憶された時間差分項  $\Delta T_n$  の値を変更し、ピッチデータと時間差分項  $\Delta T_n$  の変換特性を変更することによって、また、テーブル 20 に記憶された摂動ゲイン  $K_n$  の値を変更し、また、非線形振動部 11 が演算する差分方程式  $f(\Delta T_n, K_n)$  の種類や、波形発生部 15 内に記憶した基準波形  $y_h$  を変更することによって、そして演奏者の操作により任意に選択できるようにすることにより、シミュレートする楽器の種類や機種に応じてさまざまな音色の合成にも対応することができる。

【0064】また、本実施の形態によれば、計時用カウンタ 19 と摂動ゲイン制御用テーブル 20 が時間の経過に応じて摂動ゲイン  $K_n$  を値 0 から値 0.3 (非線形振動部 11 が安定した周期波形を形成できる摂動ゲインの値) に向けて徐々に増加させることによって、立ち上がりが不安定でかつ高調波に富んだ、いわゆる自然楽器の立ち上がりの音色に近い楽音波形を合成し、立ち上がり以降は基本ピッチに準じた安定した周期波形、即ち自然楽器の定常区間の音色に近い楽音波形を合成することができる。

【0065】なお、波形発生部 15 としては、予め自然楽器音をサンプリングしたデータを記憶しておき、これを読み出すように構成してもよいし、また、外部の周期信号をリアルタイムでアナログ-デジタル変換する変換



回路としてもよい。また、非線形振動部 1 1 は、互いに異なる合成アルゴリズムを直列あるいは並列に組み合わせるように構成してもよいし、また、非線形振動部 1 1、即ちマイコンや DSP（デジタルシグナルプロセッサ）の処理能力の向上に合わせて合成アルゴリズムを複雑化させたり、また 1 サンプル時間間に合成アルゴリズムを演算する演算回数  $m$  を増加させてもよい。また、各種微分方程式から差分方程式に変換する方法としてオイラー差分法を用いたが、それ以外の方法（例えばインパルス不変法）を用いて変換してもよい。

#### 【0066】

【発明の効果】本発明に係る楽音合成装置によれば、非線形微分方程式で記述される自励振動系を差分形式にデジタルシミュレートした非線形振動手段を楽音波形のピッチに相当する周期を有した周期波形で振動させることにより非線形振動手段の振動を安定化させ所望の楽音波形を合成させるに当たり、所望の楽音波形のピッチ要素に応じて非線形振動手段の差分方程式の時間差分項  $\Delta T$  の値を制御するように構成してあるので、非線形振動手段の演算上の時間軸を圧縮伸張させ、非線形振動手段が発生する固有振動（リミットサイクル）の周波数を変化させ、自然楽器音の音色の音高特性をシミュレートすることができる。また、発音開始時刻を起点として時間情報を計時し、時間要素に応じて非線形振動手段の振動ゲイン  $K_0$  を制御するように構成してあるので、楽音波形の安定度合い（周期性の度合い）及び楽音波形に重畳されるリミットサイクルの量を調整し、楽音波形の立ち上がりが不安定周期状態から徐々に安定周期状態に遷移していくといった自然楽器特有の過渡特性をシミュレートすることができる。

#### 【図面の簡単な説明】

【図 1】本発明に係る請求項 1 の楽音合成装置の構成の一例を示すブロック図である。

【図 2】本発明に係る請求項 2 の楽音合成装置の構成の一例を示すブロック図である。

【図 3】本発明に係る請求項 3 の楽音合成装置の構成の一例を示すブロック図である。

【図 4】本発明に係る請求項 4 の楽音合成装置の構成の一例を示すブロック図である。

【図 5】本発明に係る請求項 5 の楽音合成装置の構成の一例を示すブロック図である。

【図 6】本発明に係る請求項 6 の楽音合成装置の構成の一例を示すブロック図である。

【図 7】本発明に係る請求項 7 の楽音合成装置の構成の一例を示すブロック図である。

【図 8】本発明に係る請求項 8 の楽音合成装置の構成の一例を示すブロック図である。

【図 9】本発明に係る請求項 9 の楽音合成装置の構成の一例を示すブロック図である。

【図 10】本発明の実施の形態に係る楽音合成装置の構

成を示すブロック図である。

【図 11】実施の形態の場合にファンデアポールの（数 6）において可変の時間差分項  $\Delta T_0 = 0.02$ 、可変の振動ゲイン  $K_0 = 0$  としたときの楽音波形図である。

【図 12】実施の形態の場合にファンデアポールの（数 6）において可変の時間差分項  $\Delta T_0 = 0.02$ 、可変の振動ゲイン  $K_0 = 0.7$  としたときの楽音波形図である。

【図 13】実施の形態の場合にレスラーの（数 3）において可変の時間差分項  $\Delta T_0 = 0.005$  とし、可変の振動ゲイン  $K_0$  を値 0 から徐々に増加していき値 0.3 まで変化させたときの楽音波形図である。

【図 14】従来の技術に係る楽音合成装置の構成を示すブロック図である。

【図 15】従来の技術の場合にレスラーの（数 3）において固定の時間差分項  $\Delta T_0 = 0.005$ 、固定の振動ゲイン  $K_0 = 0$  としたときの楽音波形図である。

【図 16】従来の技術の場合にレスラーの（数 3）において固定の時間差分項  $\Delta T_0 = 0.005$ 、固定の振動ゲイン  $K_0 = 0.3$  としたときの楽音波形図である。

【図 17】従来の技術の場合にファンデアポールの（数 6）において固定の時間差分項  $\Delta T_0 = 0.005$ 、固定の振動ゲイン  $K_0 = 0$  としたときの楽音波形図である。

【図 18】従来の技術の場合にファンデアポールの（数 6）において固定の時間差分項  $\Delta T_0 = 0.005$ 、これらの振動ゲイン  $K_0 = 0.7$  としたときの楽音波形図である。

#### 【符号の説明】

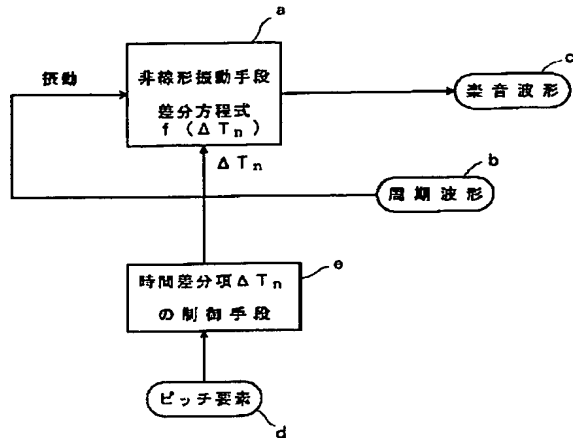
- a ……非線形振動手段
- b ……周期波形
- b' ……振動波形
- c ……楽音波形
- d ……ピッチ要素（ピッチデータ）
- e ……時間差分項  $\Delta T_0$  の制御手段
- f ……時間要素
- g ……振動ゲイン  $K_0$  の制御手段
- h ……波形発生手段
- i ……減算手段
- j ……固有振動周波数制御手段
- p ……遅延手段
- q ……計時手段
- r ……振動ゲイン制御手段
- s ……選択手段
- $\Delta T_0$  ……時間差分項
- $K_0$  ……振動ゲイン
- 1 1 ……非線形振動部（非線形振動手段）
- 1 2 ……減算器（減算手段）
- 1 3 ……乗算器
- 1 4 ……ゲート回路

- 15 …… 波形発生部 (波形発生手段)  
 16 …… 遅延器 (遅延手段)  
 17 …… 選択器 (選択手段)  
 18 …… 固有振動周波数制御用テーブル (固有振動周波

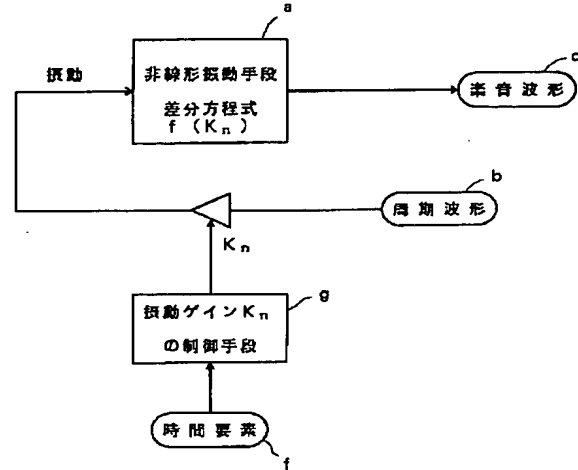
数制御手段)

- 19 …… 計時用カウンタ (計時手段)  
 20 …… 摂動ゲイン制御用テーブル (摂動ゲイン制御手  
 段)

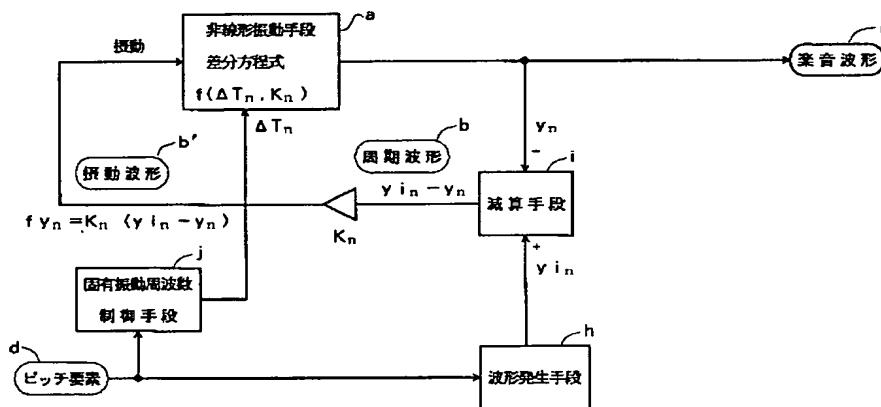
【図 1】



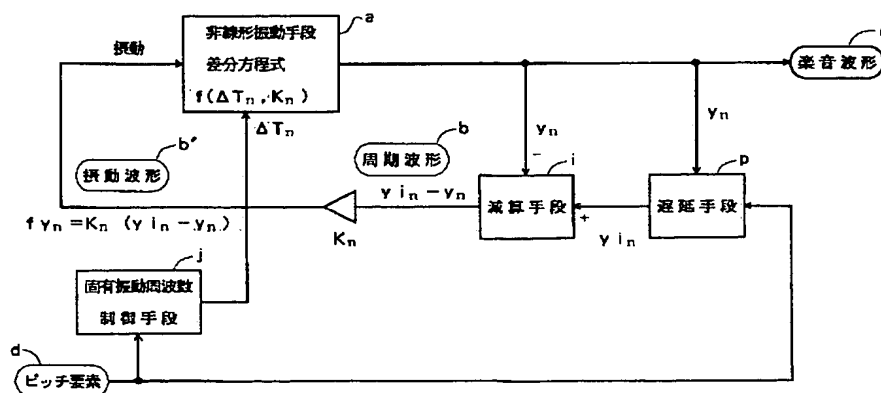
【図 2】



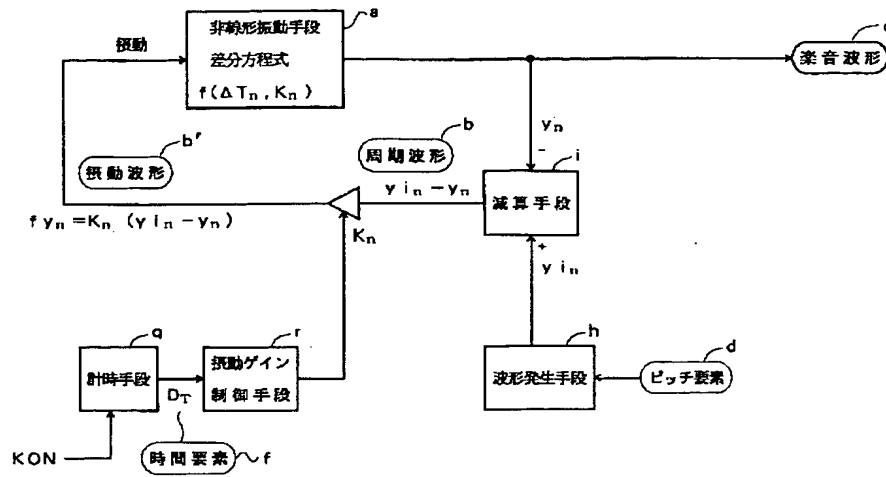
【図 3】



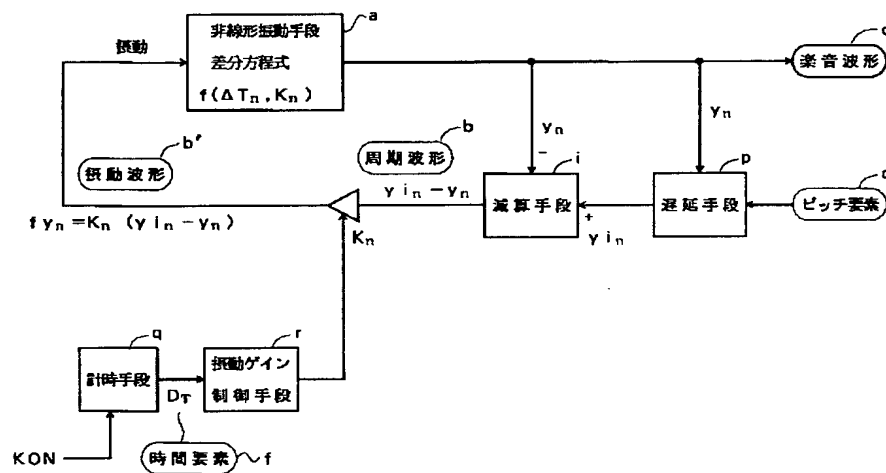
【図 4】



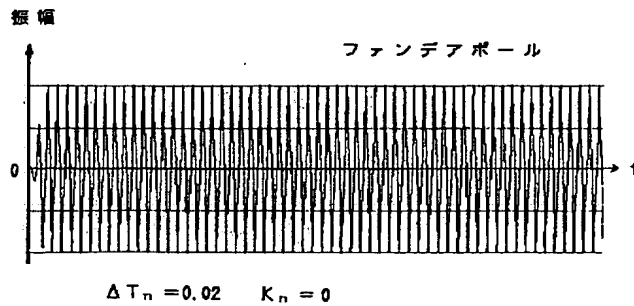
【図 5】



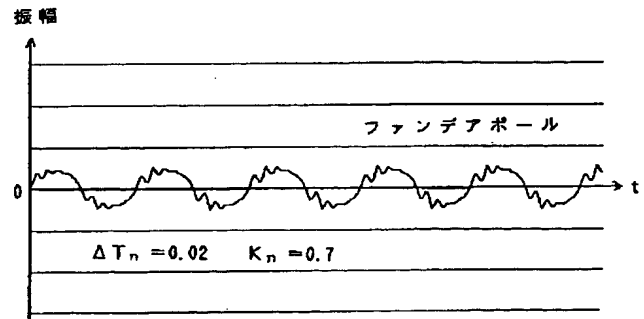
【図 6】



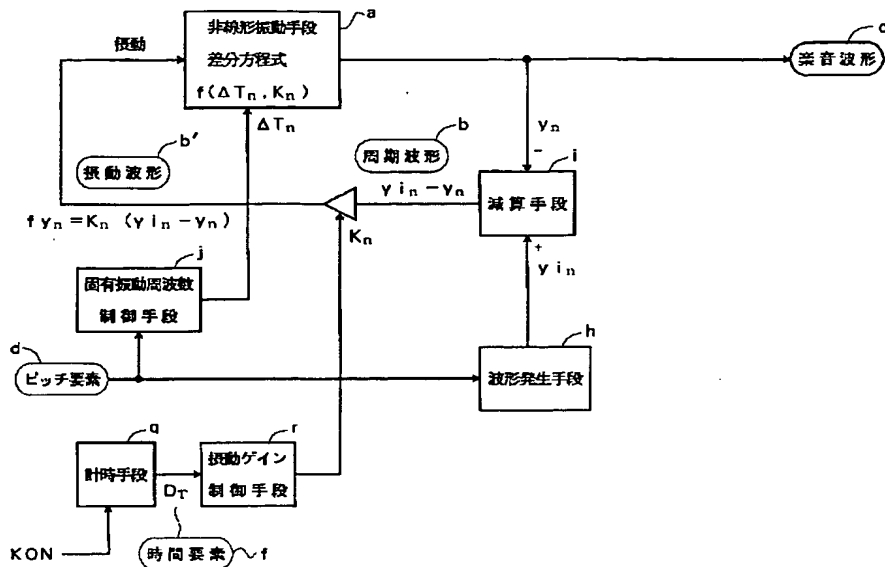
【図 11】



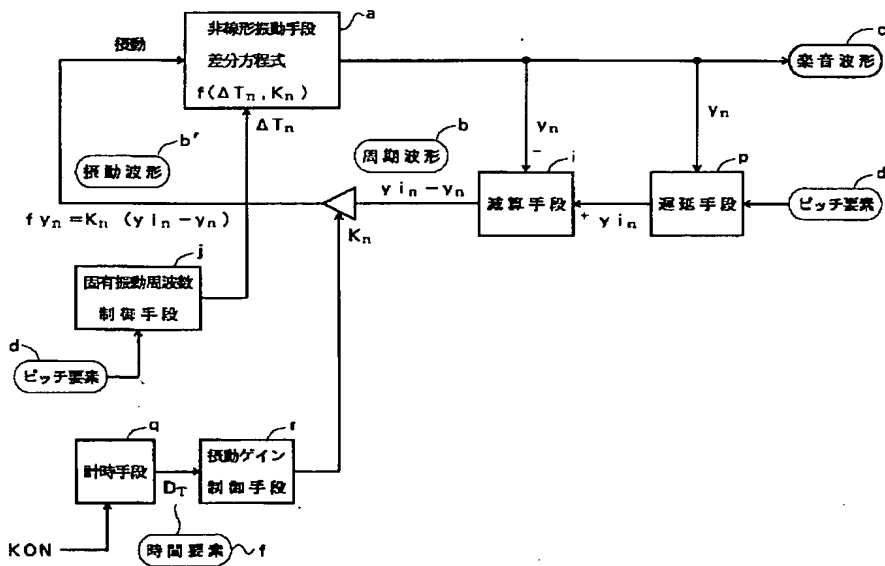
【図 12】



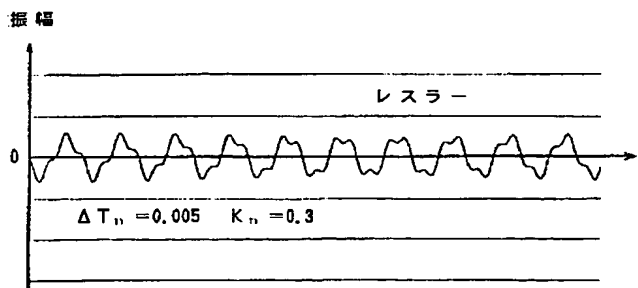
【図 7】



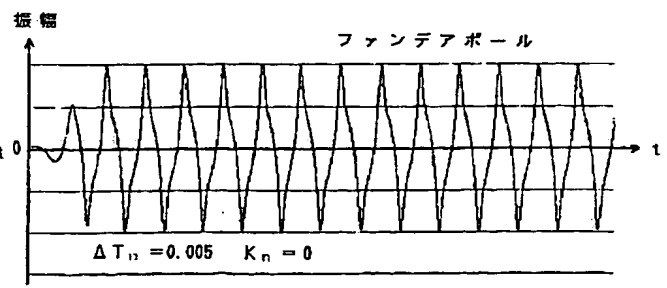
【図 8】



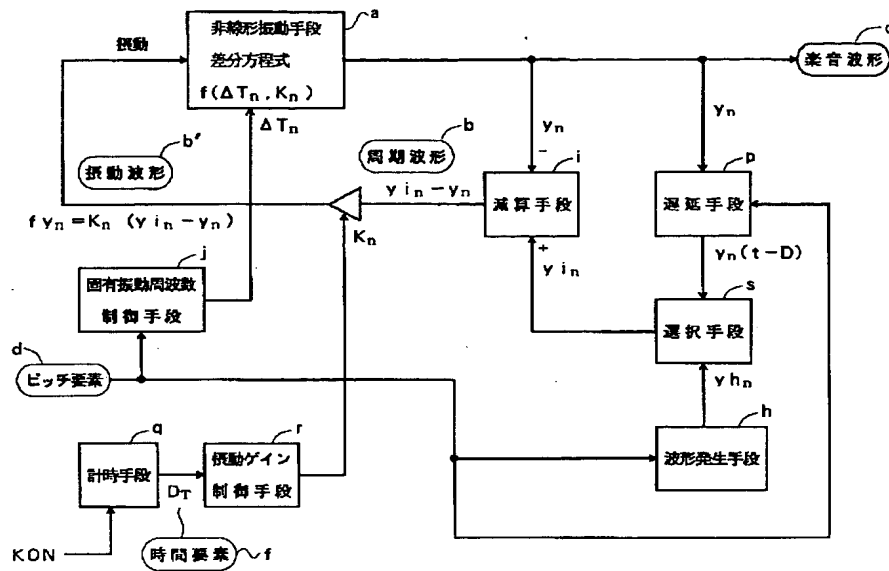
【図 16】



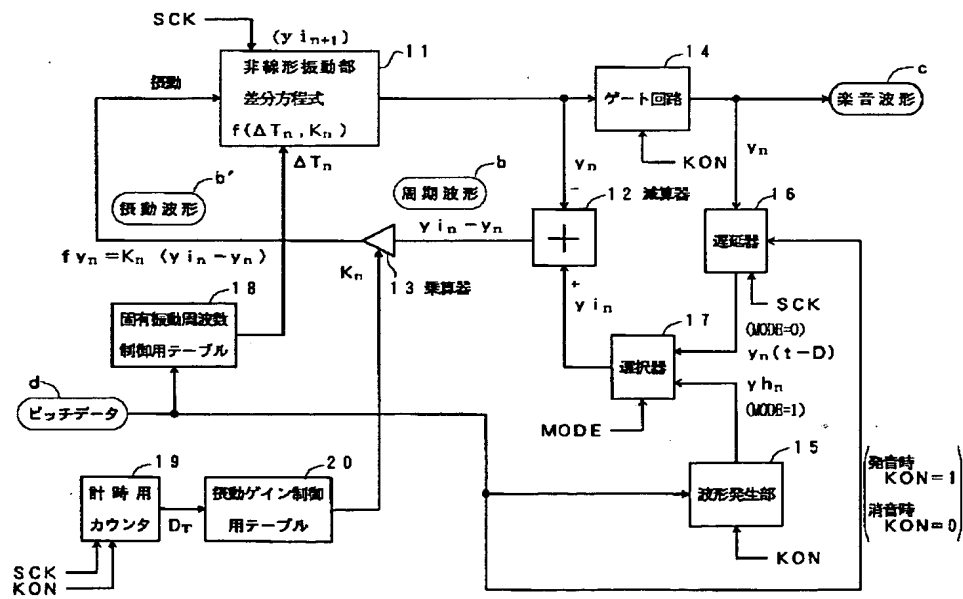
【図 17】



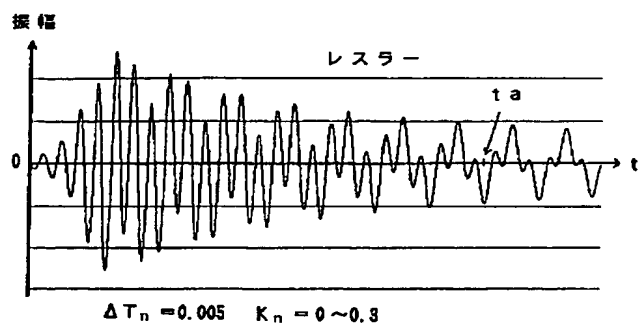
【図 9】



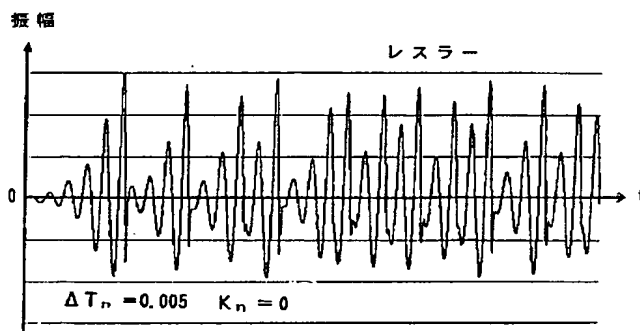
【図 10】



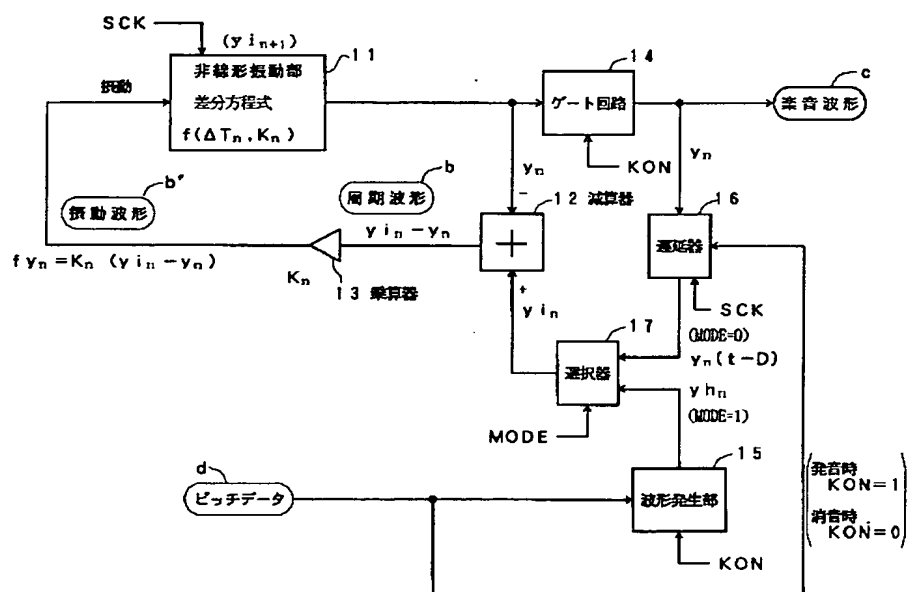
【图 13】



【図 15】



【図 14】



【図 18】

